

# MicroSculpt : Une approche en espace image pour la manipulation de matériaux anisotropes

Boris Raymond, Pascal Barla, Gael Guennebaud

► **To cite this version:**

Boris Raymond, Pascal Barla, Gael Guennebaud. MicroSculpt : Une approche en espace image pour la manipulation de matériaux anisotropes. Journées de l'Association Française d'Informatique Graphique (AFIG), Nov 2012, Calais, France. pp.113-118, 2012, 25èmes journées de l'Association Française d'Informatique Graphique. <hal-00766602>

**HAL Id: hal-00766602**

**<https://hal.inria.fr/hal-00766602>**

Submitted on 18 Dec 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# MicroSculpt : Une approche en espace image pour la manipulation de matériaux anisotropes

Boris RAYMOND, Pascal BARLA, Gaël GUENNEBAUD

INRIA - U.Bordeaux - IOGS - CNRS

---

## Résumé

*L'apparence d'un objet dépend principalement des caractéristiques de son matériau. Bien que beaucoup de travaux se soient intéressés à l'édition interactive de matériaux, peu se sont souciés du contrôle spécifique de l'anisotropie. Cet article présente une étude géométrique des liens qui existent entre les caractéristiques des matériaux anisotropes et le comportement des reflets qui en résulte. En s'appuyant sur cette étude, nous proposons un système d'édition interactif permettant de contrôler indirectement la direction d'anisotropie de manière à reproduire un jeu de reflets déterminé par l'utilisateur. Les reflets sont définis à l'aide d'outils simples tel que des brosses ou gommages.*

*The appearance of an object mainly depends on its material characteristics. While many previous methods have focused on the interactive edition of materials, few of them have worried about specifically controlling anisotropy. This paper presents a geometrical study of the relationships between the characteristics of anisotropic materials and the resulting observed reflections. Relying on this study, we propose an interactive edition system which allows users to control directly the shape of reflections, in reality modifying the direction field used for locally orienting material anisotropy. With this approach, reflections are simply drawn with tools such as brushes and erasers, while providing coherent shading behaviors for novel lighting or viewing directions.*

---

**Mots clé :** Informatique Graphique, Apparence, Matériaux Anisotropes

## 1. Introduction

La synthèse d'image 3D repose sur l'interaction de trois éléments clés : la forme, la lumière et les matériaux. Du point de vue de la perception, le matériau est effectivement très important, c'est lui qui permet de percevoir les caractéristiques de l'objet [Ade01]. La compréhension des matériaux et leur influence sur l'apparence d'un objet est un axe de recherche important dans le domaine de l'informatique graphique. Cet article propose une approche inverse et fournit des outils qui permettent de trouver les caractéristiques d'un matériau à partir de l'apparence souhaitée.

Les matériaux sont caractérisés par la complexité de leur micro-géométries [TS67, CT82]. Dans toutes les configurations possibles de micro-géométries, les matériaux dits anisotropes tel que le métal brossé et la fourrure (cf figure 1) correspondent à des micro-géométries légèrement rugueuses mais qui présentent une orientation privilégiée. Du fait de leur complexité, il n'existe actuellement aucune méthode d'édition en espace image de ces matériaux.

Notre contribution est basé sur l'analyse du lien qui existe entre l'orientation principale des micro-géométries et les re-

flets apparaissant à la surface de l'objet. L'objectif final est d'étudier le phénomène inverse, c'est à dire de reconstruire un champ d'orientation des micro-géométries qui permettant d'obtenir les reflets désirés.

**BRDF.** La Bidirectionnal Reflectance Distribution Function définit le ratio entre la lumière provenant d'une direction  $\omega_i$  et une direction  $\omega_o$ . Dans l'équation du rendu [Kaj86] (voir eq 1), le matériau est représenté par une fonction appelée la BRDF (Bi-directionnal Reflectance Distribution Function). Cette fonction peut être approximée à la suite d'une série de mesures qui va définir la valeur de la BRDF pour un couple  $\omega_i$  et  $\omega_o$  donné. Cette représentation discrète offre une bonne précision mais l'édition est difficile. Une BRDF peut également être représentée à l'aide de fonctions analytiques qui vont permettre d'approcher les résultats d'une BRDF mesurée. Les modèles de BRDF (e.g., [LFTG97, APS00]) sont des fonctions analytiques dont les paramètres sont suffisamment intuitifs pour permettre d'éditer le matériau.

**Notation.** Pour chaque point de l'image, l'éclairage directe de la scène est calculée grâce à l'équation suivante :

$$L_o(\omega_o) = \int_{\Omega} \rho(\omega_i, \omega_o)(\omega_i \cdot n)L(\omega_i) d\omega_i. \quad (1)$$



Figure 1: Des exemples réels de reflets complexes sur des matériaux anisotropes.

avec :

- $\omega_i$  le vecteur de direction de la lumière incidente
- $\omega_o$  le vecteur de la direction du point de vue
- $\rho$  la BRDF caractérisant le matériau
- $L(\omega_i)$  la quantité de lumière provenant de la direction  $\omega_i$ .

Dans le cadre de modèles de BRDF représentant une distribution de micro-facettes [APS00], la bissectrice entre  $\omega_o$  et  $\omega_i$  est très importante, en anglais elle est appelée le Half-vector et elle est noté  $\mathbf{h} = \frac{\omega_o + \omega_i}{\|\omega_o + \omega_i\|}$ .

## 2. Travaux antérieurs

Pour travailler directement sur l'apparence des objets et des matériaux, plusieurs approches ont déjà été proposées. Une première approche pour modifier l'apparence consiste à modifier les paramètres de la BRDF [BAOR06, BAERD08, CPK06].

Ben-Artzi [BAOR06, BAERD08] s'est intéressé à l'édition intuitive des BRDF. L'édition se fait, de manière indirecte, en modifiant des courbes qui vont agir sur les paramètres de la BRDF. De plus, l'édition se fait visuellement et permet d'unifier les différents paramètres de la BRDF (Cook-Torrance [CT82], mesurés, Ashikhmin [APS00]). Par exemple, une courbe va permettre de changer l'anisotropie d'un matériau, d'ajouter des réflexions ou d'accroître l'intensité de l'effet Fresnel. Dans cette approche, les paramètres de la BRDF sont dynamiquement modifiés. Les modifications sont visualisées en temps réel même dans le cas d'une scène avec un éclairage globale grâce à de nombreuses optimisations mais au détriment du point de vue qui reste fixe.

BRDF-Shop est un outil d'édition de BRDF travaillant en espace image [CPK06]. L'édition ne se fait pas directement sur l'objet. Une sphère possédant le même matériau que l'objet est également affichée et c'est sur cette dernière que l'utilisateur peut dessiner les reflets qu'il souhaite. Ensuite,

une BRDF qui permet d'obtenir ces reflets sur la sphère est calculée et ce nouveau matériau est appliqué sur l'objet final. En plus de la contrainte de la sphère, l'environnement lumineux de l'édition est contraint à une seule lumière ponctuelle blanche afin de faciliter le dessin des reflets.

Une seconde approche consiste à modifier l'environnement lumineux [Pel10, OMI\*06]. Afin que l'édition de l'apparence soit directe, il faut avant tout connaître la BRDF utilisée. La BRDF peut donc être inversée afin de retrouver les zones de l'environnement lumineux qui contribuent à l'illumination de la région de l'édition. Les zones de l'environnement lumineux ainsi sélectionnées ne contribuent pas seulement dans la région voulue et leur modifications risquent d'entraîner la modification de l'apparence des autres régions de l'objet.

Parmi l'ensemble des solutions proposées actuellement, aucune ne propose d'outil d'édition permettant de contrôler l'anisotropie des matériaux.

## 3. Concept général

Nous nous intéressons aux matériaux anisotropes, plus particulièrement ceux possédant une distribution de micro-facettes dont l'orientation suit une direction privilégiée. Dans ce contexte, nous nous intéressons aux liens qui existent entre les reflets qui apparaissent sur des surfaces anisotropes, et le champ d'orientation des micro-géométries à la surface de ces matériaux. L'objectif général du projet est de réussir à générer un champ de direction qui correspond aux reflets que l'utilisateur souhaite faire apparaître sur la forme 3D.

Nous nous contraignons à créer un système qui ne restreint pas la BRDF parce que nous ne souhaitons pas nous restreindre à un unique matériau. Nous souhaitons conserver la possibilité de changer les paramètres voire le modèle de la BRDF (analytique ou mesurée). Pour ces raisons, nous proposons une méthode qui agit uniquement sur le champ des directions des micro-géométries. Ces directions servent

par la suite à appliquer une rotation à la BRDF (quelconque) avant qu'elle ne soit évaluée.

La première partie du projet consiste à étudier les caractéristiques géométriques mises en jeu dans l'illumination d'un matériau anisotrope (section 4). Une fois que le lien entre les reflets et le champ de direction est bien appréhendé, la seconde partie a pour but de trouver une solution qui permet, pour une seule lumière, de trouver un champ de direction qui correspond à un jeu de reflets préalablement fourni (section 5). Nous verrons par la suite comment étendre l'algorithme à un environnement lumineux plus complexe (section 6). Parallèlement, nous présentons un prototype d'interface destiné à l'édition en espace image des reflets.

#### 4. Etude et observation des reflets anisotropes

L'article "Specularities on Surfaces with Tangential Hairs or Grooves" [LKKI00] est le point de départ de notre étude. Les auteurs s'intéressent aux liens qui existent entre un matériau anisotrope et la forme des reflets correspondants. Les matériaux anisotropes sont caractérisés par leurs micro-géométries qui ont la particularité d'être orientées de manière régulière. Afin d'observer le comportement, dans cette étude l'orientation principale des micro-géométries est représentée à l'échelle macroscopique par des fibres plaquées sur la surface d'objets géométriques simples. Les reflets et leur comportement sont révélés par une lumière que l'on déplace autour de l'objet (voir figure 2).

Comme le montre la figure 2, le reflet d'un matériau anisotrope décrit un trait de lumière transversal au sens des fibres et exhibe des motifs complexes.

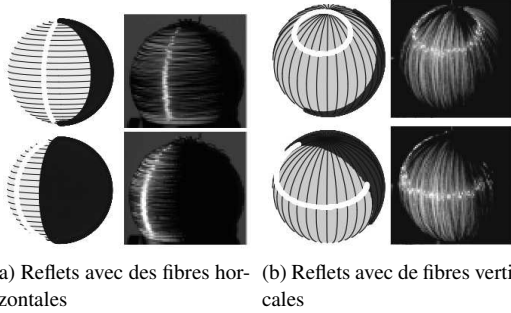


Figure 2: Les prises de vue présentées dans l'article montrent le lien entre le champ de direction et le reflet [LKKI00]

Plus précisément l'article déduit la loi suivante : "Les fibres qui contribuent à la réflexion spéculaire se trouvent sur le plan orthogonal à la bissectrice  $\mathbf{h}$  entre la direction de la lumière  $\omega_i$  et la direction du point de vue  $\omega_o$ ". Dans le cadre des matériaux anisotropes, cela revient à dire que pour faire apparaître un reflet, le vecteur qui représente localement le champ de direction doit appartenir à un plan orthogonal au vecteur  $\mathbf{h}$ .

**Étude théorique.** Dans cette section nous montrons que le résultat précédent peut être obtenu de manière plus formelle, en considérant qu'une BRDF peut être représentée comme

une distribution de micro-facettes. Dans ce cas, la BRDF est le produit de plusieurs termes [APS00] :

$$\rho(\omega_i, \omega_o) = \frac{D(\mathbf{h})F(\omega_i, \mathbf{h})}{G(\omega_i, \omega_o)}. \quad (2)$$

Chaque micro-facette est considérée comme un miroir parfait de normale  $\mathbf{n}_k$ . Le terme de distribution  $D$  représente le comportement statistique de la réponse de chacune des micro-facettes. Ce terme est ensuite pondéré par le terme géométrique  $G$  et le terme de Fresnel  $F$ . Nous pouvons définir le terme de distribution  $D$  par la moyenne de la réponse de chacune des micro-facettes:

$$D(\mathbf{h}) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (\mathbf{h} \cdot \mathbf{n}_k)^\infty. \quad (3)$$

Si les micro-facettes sont orientées de façon uniforme, nous avons un matériau isotrope. Bien qu'il existe une infinité de distributions non-uniformes, la plupart des matériaux réels anisotropes admettent une direction d'anisotropie privilégiée  $\mathbf{u}$ . Plus précisément nous supposons que la micro-géométrie représentée par les micro-facettes présente des variations maximales dans la direction orthogonale à  $\mathbf{u}$ , autrement dit les normales des micro-facettes sont donc majoritairement orthogonales à  $\mathbf{u}$  (cf. figure 3).

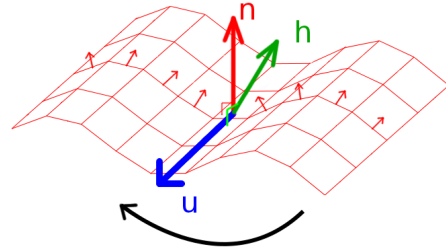


Figure 3: Dans le cas idéal, les normales ne varient que dans une direction (flèches en rouges) et sont donc contraintes à rester sur le même plan. Le reflet anisotrope apparaît lorsque  $\mathbf{h}$  (en vert) est lui aussi contenu dans ce plan.

Pour de tels matériaux, étant donnée une direction de vue et de lumière, la valeur de la BRDF  $\rho(\omega_i, \omega_o)$  (équation 3) est donc maximisée lorsque  $\mathbf{u}$  est orthogonal à  $\mathbf{h}$ . Nous retrouvons donc bien le résultat obtenu expérimentalement par Koenderink avec leur modèle par fibres.

Puisque nous nous trouvons à la surface d'un objet, le champ de direction doit aussi être tangent à la surface; les directions du champ doivent être sur un plan orthogonal au vecteur normal. Le vecteur de direction doit donc être orthogonal à la fois au vecteur  $\mathbf{h}$  et au vecteur  $\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{u}$  est donc égal au produit vectoriel entre  $\mathbf{h}$  et  $\mathbf{n}$ . Nous obtenons donc une direction idéale qui laissera obligatoirement apparaître un reflet anisotrope sous réserve que l'anisotropie soit suffisamment forte et qu'une lumière illumine la zone.

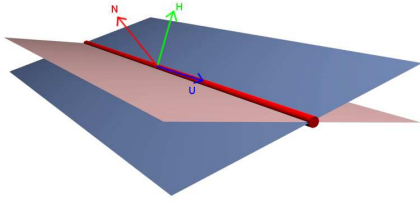


Figure 4: La direction idéale  $\mathbf{u}$  est l'intersection des plans orthogonaux à  $\mathbf{h}$  et  $\mathbf{n}$

## 5. Édition directe des matériaux anisotropes

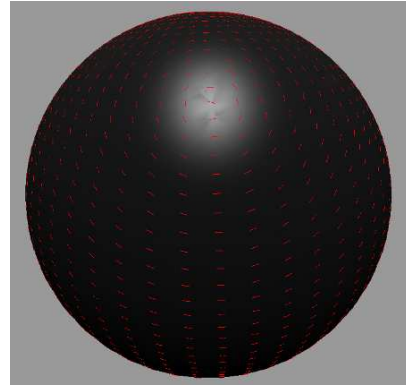
**Champ de direction maximal.** Le résultat précédent permet de définir un champ de directions idéales où, pour un point de vue donné et une lumière donnée, à chaque point de la surface de l'objet, les micro-géométries seraient orientées de manière à favoriser l'apparition de reflets (voir figure 5). Le champ idéal permet d'étendre le reflet à mesure que l'anisotropie augmente. Le champ idéal est la piste que nous suivons pour réussir à créer un champ de direction à partir des reflets que nous voulons obtenir. Notons cependant que nous sommes toujours dans les conditions de Koenderink où il n'y a qu'une seule lumière.

Pour faire apparaître des reflets, il faut aligner notre champ de direction avec le champ idéal. Lors du rendu, le calcul de la BRDF nécessite un repère local pour s'appliquer. Ce repère est défini par le triplet  $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{n})$  avec  $\mathbf{n}$  la normale au point. Le champ de direction d'un maillage est donc défini par rapport à la direction de  $\mathbf{u}$  définissant l'orientation du repère local. Ainsi, lorsque le matériau est édité, ce n'est pas la BRDF qui est modifiée mais seulement le repère dans lequel elle est appliquée, la solution reste donc indépendante de la BRDF.

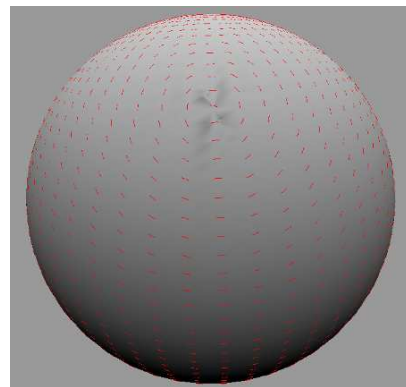
Pour valider la méthode, nous avons créé deux outils qui permettent d'éditer le champ de direction à partir d'un champ initial. A l'instar des normales, notre champ de direction est défini à chaque sommet du maillage.

**Alignement total.** Le premier outil consiste à aligner tout le champ de direction d'un objet avec le champ de direction idéal pour le point de vue et la lumière actuelle. L'objet obtenu par ce traitement réfléchit toute la lumière dans la direction du point de vue (voir figure 5 b). Cet objet n'existe pas dans la nature donc le rendu est surprenant, néanmoins l'exemple est physiquement plausible.

**Alignement local.** Afin permettre une édition plus localisée, nous créons un autre outil qui prend la forme d'une brosse. La brosse va remplir la même fonction que l'alignement total mais dans un voisinage local. Cette brosse est utilisée en espace image, on peut donc à l'instar des logiciels de retouche d'image dessiner directement les reflets sur l'objet. Le logiciel retrouve automatiquement les sommets du maillage qui ont été sélectionnés et il modifie localement leur vecteur de direction (voir figure 6).



(a) Sphère sans anisotropie, le champ de direction (en rouge sur l'image) n'influe pas sur le rendu.



(b) Sphère avec anisotropie au maximum et champ de direction idéal.

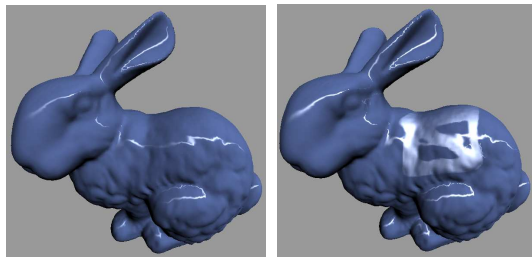
Figure 5: Dans le cas de l'utilisation d'une BRDF anisotrope, le champ idéal permet d'étendre le reflet à mesure que l'anisotropie augmente, l'anisotropie maximum permet d'obtenir un objet peu commun qui reflète entièrement la lumière.

## 6. Généralisation à plusieurs lumières

Comme le champ idéal d'un objet est déterminé par le produit vectoriel entre  $\mathbf{n}$  et  $\mathbf{h}$ , et que  $\mathbf{h}$  dépend de  $\omega_i$  qui correspond à la direction de la source de lumière, il existe un champ idéal différent pour chacune des sources de lumières (voir figure 7). Il n'existe donc pas de champ de direction idéal favorisant l'apparition des reflets de toutes les lumières.

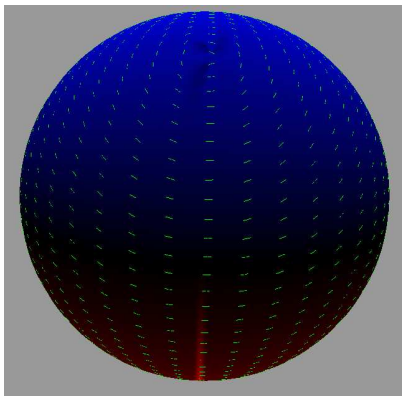
La solution idéale serait de trouver un vecteur de direction qui générerait l'apparition de reflets même s'il n'est pas idéal pour chacune des lumières. Une idée naïve serait de choisir le vecteur moyen des vecteurs de direction idéale pondérée par l'intensité de la contribution de chacune des lumières. Cette intuition est hélas fautive. Ceci est dû au fait de la non linéarité du lien entre l'orientation des micro-géométries et l'intensité des reflets. Ainsi, si le vecteur moyen est appliqué au champ de direction, le résultat sera incohérent et il n'y aura pas de reflets à l'endroit voulu (voir figure 8).

**Favorisation d'une lumière.** Comme il n'existe pas de champ idéal commun à plusieurs lumières, la meilleure op-

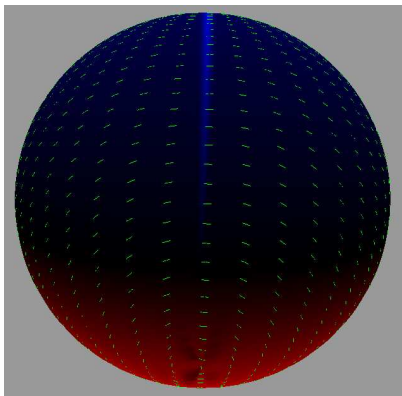


(a) Rendu anisotrope avec un champ de direction quelconque (b) Le champ de direction est modifié localement pour correspondre au champ de direction idéal

Figure 6: L'outil brosse permet de dessiner les reflets sur l'objet, ici un motif est ajouté sur le dos du lapin de Stanford.



(a) Champ idéal pour la lumière bleue



(b) Champ idéal pour la lumière rouge

Figure 7: Dans la même scène constituée de deux sources de lumières (une rouge et une bleue dans l'image), il y a un champ idéal pour chacune des sources de lumières présentes (en vert dans les images).

tion consiste à considérer localement une seule lumière. Le champ de direction est alors localement aligné avec le champ de direction idéal de l'une des sources de lumière pour en révéler les reflets. Dans le cas d'un faible nombre de lumière, le choix de la lumière peut être laissé à l'utilisateur (voir figure 9 (a)).

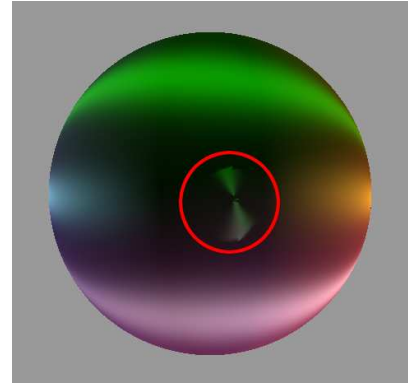
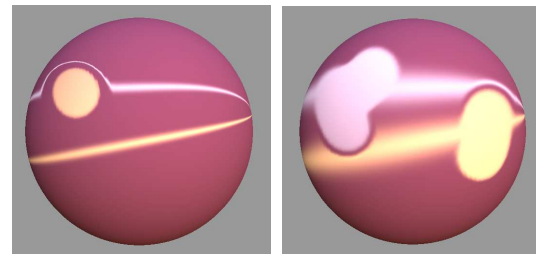


Figure 8: Les quatre lumières de la scène sont représentés par des couleurs différentes. Lorsque les directions idéales sont moyennées (cercle rouge), l'apparition des reflets est incontrôlable.

Pour le cas d'un grand nombre de lumière ou d'une carte d'environnement [BN76], la sélection de la lumière doit être dynamique. Dans ce cas, il faut créer des outils plus élaborés que la brosse d'apparition de reflet.

Un outil alternatif serait la brosse d'étalement des reflets. Lorsque l'utilisateur clique, l'outil d'étalement des reflets permet de sélectionner automatiquement la lumière qui contribue le plus dans la région sélectionnée. C'est cette lumière qui va être favorisée lorsque l'utilisateur va dessiner sur son objet provoquant ainsi un étalement du reflet (voir figure 9 (b)).



(a) Sélection arbitraire (b) Sélection dynamique

Figure 9: La sélection arbitraire permet de faire apparaître les reflets à n'importe quel endroit de la surface, comme le cercle jaune sur le tracé du reflet bleu (à gauche). La sélection dynamique permet d'étendre les reflets même au dépend d'autres reflets (à droite). Du fait des limitations de la brosse, les autres reflets sont aussi déviés comme le reflet rose pale sur l'image de gauche.

## 7. Conclusion et travaux futurs

Dans cet article, nous proposons une solution intuitive pour éditer les matériaux anisotropes en espace image en restant indépendant de la BRDF. Cette dernière repose sur une étude théorique et pratique du lien entre le comportement des reflets et l'orientation des micro-géométries. Grâce à elle,

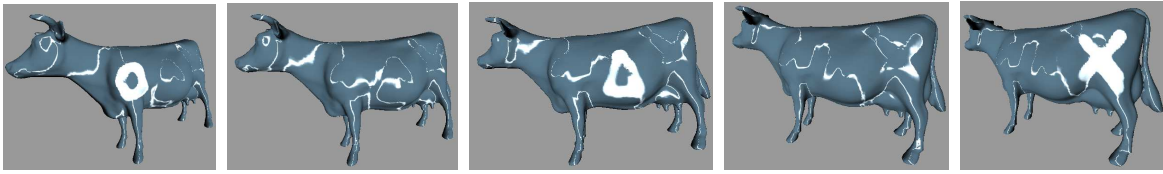


Figure 10: Lorsque le point de vue change, des reflets dessinés apparaissent pendant que d'autres disparaissent

nous avons créé le concept de champ idéal pour une lumière et nous avons mis en avant quelques outils pour démontrer l'intérêt du concept. Comme une scène ne comporte que rarement une seule lumière, il est important de trouver des solutions permettant d'effectuer une édition directe dans le cadre d'un éclairage plus complexe. Des outils plus génériques ont été abordés pour créer des solutions génériques et indépendantes de l'environnement lumineux.

Grâce à ces outils, de nombreuses applications peuvent être imaginées. L'application la plus directe est de pouvoir dessiner directement des reflets sur un objet, ces reflets n'apparaîtront que lorsqu'une configuration particulière des directions de vue et de lumière est respectée. Ainsi, des reflets particuliers peuvent apparaître de manière complètement contrôlés (voir figure 10). A l'inverse, en dessinant des reflets, nous pouvons maintenant obtenir le champ de direction qui a permis de les obtenir, et nous pouvons les reproduire dans le monde réel, par exemple, en brossant un métal dans les directions calculées ou en fabricant un grillage selon ces mêmes directions.

Cependant, l'outil est limité aux matériaux anisotropes qui sont globalement orientés dans une seule direction et l'édition dans des environnements lumineux plus complexes est encore difficile.

Beaucoup de pistes peuvent être suivies pour les travaux futurs. La création d'un programme permettant de trouver quel que soit l'environnement lumineux la direction depuis laquelle le matériau renvoie le plus de lumière est nécessaire afin de s'abstraire complètement de la question de la lumière utilisée. Pour des environnements très complexes comme les cartes d'environnements et les lumières non-punctuelles (sources étendues), il faudra sûrement effectuer un échantillonnage pour trouver la direction optimale.

Les matériaux anisotropes ne sont pas tous orientés dans une seule direction. Entre l'anisotropie simple et le comportement diffus, il existe des matériaux orientés dans plusieurs directions tel que le velours ou le satin qui suivent globalement deux directions à cause de la forme des mailles. Pour contrôler ces matériaux, il va falloir trouver une version généralisée de la solution présentée dans cet article.

La stabilité des reflets lors d'une variation du point de vue n'est pas simple à appréhender. Même si nous savons qu'une forte courbure géométrique ou géodésique permet d'augmenter la stabilité à la variation du point de vue [LKK100], il n'existe pas encore de règle exacte qui permette de calculer la variation du reflet en fonction de la variation du point de vue. Raffiner notre compréhension de l'anisotropie permettrait à plus long terme de mieux comprendre la per-

ception humaine de l'anisotropie, autrement dit de savoir selon quelles conditions l'être humain se dit qu'un matériau est anisotrope en se basant seulement sur son apparence visuelle.

## Références

- [Ade01] ADELSON E. H.: On seeing stuff: the perception of materials by humans and machines. *Proceedings of SPIE. Vol. 4299* (2001), 1–12.
- [APS00] ASHIKMIN M., PREMOŽE S., SHIRLEY P.: A microfacet-based brdf generator. In *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (New York, NY, USA, 2000), SIGGRAPH '00, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 65–74.
- [BAERD08] BEN-ARTZI A., EGAN K., RAMAMOORTHY R., DURAND F.: A precomputed polynomial representation for interactive BRDF editing with global illumination. *ACM Transactions on Graphics. Vol. 27, Num. 2* (avril 2008), 1–13.
- [BAOR06] BEN-ARTZI A., OVERBECK R., RAMAMOORTHY R.: Real-time BRDF editing in complex lighting. In *ACM Transactions on Graphics* (juillet 2006), vol. 25, ACM, p. 945.
- [BN76] BLINN J. F., NEWELL M. E.: Texture and reflection in computer generated images. *Communications of the ACM. Vol. 19, Num. 10* (octobre 1976), 542–547.
- [CPK06] COLBERT M., PATTANAIK S., KRIVANEK J.: Brdf-shop: Creating physically correct bidirectional reflectance distribution functions. *IEEE Comput. Graph. Appl. Vol. 26* (January 2006), 30–36.
- [CT82] COOK R. L., TORRANCE K. E.: A reflectance model for computer graphics. *ACM Trans. Graph.. Vol. 1* (January 1982), 7–24.
- [Kaj86] KAJIYA J. T.: The rendering equation. *Technology. Vol. 20, Num. 4* (1986), 143–150.
- [LFTG97] LAFORTUNE E. P. F., FOO S.-C., TORRANCE K. E., GREENBERG D. P.: Non-linear approximation of reflectance functions. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (New York, NY, USA, 1997), SIGGRAPH '97, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 117–126.
- [LKK100] LU R., KOENDERINK J. J., KAPPERS A. M. L., INSTITUUT H.: Specularities on Surfaces with Tangential Hairs or Grooves. *Computer Vision and Image Understanding. Vol. 1, Num. 3* (2000), 320–335.

- [OMI\*06] OKABE M., MATSUSHITA Y., IGARASHI T., SHUM H.-Y., REPORT T., CORPORATION M., WAY O. M.: Illumination Brush: Interactive Design of Image-based Lighting.
- [Pel10] PELLACINI F.: envyLight: an interface for editing natural illumination. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)* (2010), vol. 29, ACM, p. 34.
- [TS67] TORRANCE K. E., SPARROW E.: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *JOSA* (1967).